



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tehnikainstituut

Kaarel Paurson

**PLASTMASSIDE EELKUIVATAMISE ENERGIA TÕHUSUS**  
**ENERGY EFFICIENCY OF PLASTICS PRE-DRYING**

Bakalaureusetöö  
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: lektor Toivo Leola, *MSc*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kaarel Paurson		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Plastmasside eelkuivatamise energiatõhusus			
Lehekülgi: 40	Jooniseid: 16	Tabeleid: 6	Lisasid: 0
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika			
4.17. Energeetikaalased uuringud			
T140 Energeetika			
Juhendaja(d): Toivo Leola			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2019			
<p>Tänapäeva tihe konkurents autotööstuses esitab survevaluettevõttes toodetavate plastikdetailide kvaliteedile väga kõrgeid nõudmisi. Plastikmaterjali korrektne eelkuivatamine annab olulise panuse kvaliteetse toodangu valmistamisel, võimaldades vähendada mehaaniliste omaduste ja visuaalse väljanägemise poolest mittevastuvõetavate toodete hulka. Plastmasside kuivatamine on võrdlemisi energiamahukas tegevus, hõlmates ligi kümnendiku kogu tehase energiatarbest. Sellest faktis lähtudes on energia kokkuhoiu huvides vaja uurida, kas plastmasside kuivatamisprotsessi käigus esineb energiaraiskamist ja mil viisil oleks võimalik sellist raiskamist vähendada. Kuna plastikute niiskussisalduse reaalajas mõõtmine pole triviaalne tegevus, siis on materjalitootjad vastuvõetava niiskussisalduse saavutamiseks ette näinud kindlad protseduurid ja režiimid plastiku kuivatamiseks, määrates kindla kuivatustemperatuuri ja aja kui kaua materjal kuivatis peab olema. Autor üritab antud töös katseliselt tuvastada, kas materjal tõesti vajab nii pikka kuivatusaega kui tootja on ette näinud. Katsetuste käigus selgus, et tõepoolest teatud juhtudel on võimalik kuivatusaega märkimisväärselt lühendada ja sellest tulenevalt ka energiat kokku hoida. Antud töö loob eeldused edasisteks uuringuteks, millest autori hinnangul ambitsioonikaim on materjali niiskussisalduse reaalajas kuivati juures mõõtmine ning sellest loogiliselt järelduvana kuivatusprotsessi täielik automatiseerimine, lõppeesmärgina kasutada kuivatamiseks kuluvat energiat võimalikult efektiivselt.</p>			
Märksõnad: niiskussisaldus, polümeer, kastepunkt, survevalu			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Bachelor's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Kaarel Paurson		Curriculum: Engineering	
Title: Energy Efficiency of Plastics Pre-drying			
Pages: 40	Figures: 16	Tables: 6	Appendixes: 0
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering			
Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering			
4.17. Energetic research			
T140 Energy research			
Supervisor: Toivo Leola			
Place and date: Tartu, 2019			
<p>Intense competition in the automotive industry places very high demands on the quality of plastic parts produced by an injection molding company. Correct pre-drying of the plastic material makes an important contribution to the manufacturing of high quality products, reducing significantly the amount of products that are unacceptable in terms of mechanical properties and visual appearance. Drying of plastics is a relatively energy intensive activity, accounting for about one tenth of the total energy consumption of the plant. So in order to save energy, it is necessary to investigate whether and how energy wastage occurs during the drying process. Because real-time measurement of the moisture content in plastics is generally not a trivial task, material manufacturers have established specific procedures and modes for drying the plastic to achieve acceptable moisture content, by specifying a correct drying temperature and the length of time the material should remain in the dryer. The author tries to determine whether the material really needs the amount of drying time as the manufacturers have proposed. It was found during tests that in some cases it is possible to significantly reduce the drying time and, consequently, to save energy. This thesis provides the basis for further research, of which the author considers the most ambitious the real-time measurement of the moisture content of the material at the dryer and, consequently, the complete automation of the drying process, with the ultimate goal of using energy for drying as efficiently as possible.</p>			
Keywords: moisture content, polymer, dew point, injection molding			

# SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID .....	5
SISSEJUHATUS .....	6
1. VALDKONNA ÜLEVAADE .....	7
1.1. Ettevõtte tutvustus .....	7
1.2. Plastikmaterjalide ülevaade .....	8
1.3. Mõningaid ettevõttes kasutatavaid polümeere .....	10
1.4. Lisa- ja abiained plastides .....	12
1.5. Survevaluprotsess .....	13
1.6. Liigniiskuse mõju plastikule .....	14
1.7. Energiasäästu meetmed ettevõttes .....	16
2. PLASTIDE KUIVATAMISE KIRJELDUS .....	18
2.1. Kuivatamise põhialused .....	18
2.2. Plastmasside kuivatamise iseärasused .....	18
2.3. Plastmasside ülekuivatamine .....	19
2.4. Kuiva õhu kuivati tööpõhimõte .....	20
2.5. Kuivati Gerco TTM-2/200E .....	23
3. KATSEMÕÕTMINE .....	24
3.1. Plastiku niiskussisalduse mõõtmine .....	24
3.2. Mõõtemetoodika .....	25
3.3. Mõõtetulemused .....	26
4. KUIVATAMISE ENERGIATARVE .....	34
5. JÄRELDUSED .....	35
KOKKUVÕTE .....	36
SUMMARY .....	37
KASUTATUD KIRJANDUS .....	38
LIHTLITSENTS .....	40

## TÄHISED JA LÜHENDID

GF – *Glas Filled* – klaasilisandiga plastikmaterjal  
IMM – *Injection Molding Machine* - survevalumasin  
ABS – akrüülnitriil-butadieen-stüreen  
CA – tselluloosatsetaat  
PA – polüamiid (nailon)  
PBT – polübutüleentereftalaat  
PC – polükarbonaat  
PE – polüetüleen  
PET – polüetüleentereftalaat  
PMMA – polümetüülmetakrülaad (pleksiklaas)  
POM – polüoksümeteen  
PP – polüpropüleen  
PPE – polüfenüleneeter  
PPO – polüetüleenoksiid  
PS – polüstüreen  
PUR – polüuretaan  
PVC – polüvinüülkloriid  
SAN – stüreenakrüülnitriil  
TPE – termoplastelastomeer

## SISSEJUHATUS

Käesolevat bakalaureusetööd ajendas kirjutama lootus tuvastada kas plastikmaterjalide kuivatamisele kuluvat aega ja sellest tulenevalt ka kulutatavat energiat saaks kokku hoida. Erinevalt orgaanilistest ainetest ja saadustest nagu näiteks vili, puit jms, kus kuivatamisprotsessi parameetreid saab jooksvalt mõõta ja saadud andmetele vastavalt kuivatusprotsessi optimeerida, toimub plastmasside kuivatamine enamasti n-ö “jõumeetodil”, kus vastavalt materjalitootja ettekirjutustele tuleb materjali mingi kindla temperatuuri ja ettemääratud aja jooksul kuivatada, sõltumata sellest mis temperatuuriga kuivatisse minev materjal on ja kui suur on selle esialgne niiskussisaldus.

Plastikdetailide tootmises on materjali sobival niiskussisaldusel kriitiline roll, sest liiga niiske materjal võib põhjustada väga olulisi kvaliteediprobleeme. Kuivatamisega ja kuivatamisel tehtud vigadega seotud kulud saab jagada kahte ossa – otsesed ja kaudsed. Otsesed kulud on seotud energia kulutamisega kuivatusprotsessis, kaudsed kulud seevastu väljenduvad aga ebapiisavast kuivatamisest tingitud lõpptoodangu kvaliteedi halvenemises, suurenenud praagimääras ja reklamatsioonide arvus.

Töö esimeses osas antakse ülevaade vaadeldavast ettevõttest, plastmasside olemusest ja kasutusvaldkondadest, ning lihtsustatud kirjeldus plastmasside töötlemisest survevalumeetodil. Teises osas on lähema vaatluse all materjalide kuivatamise printsiibid ja plastmasside kuivatamise eripärad, ühtlasi kirjeldatakse ka enamlevinud plastikmaterjalide kuivatusmeetodeid ja kuivatite tööpõhimõtet. Kolmas osa on rakenduslik kus katseliselt leitakse tegelikud kuivatusajad, mille jooksul vaadeldavad materjalid saavutasid soovitud niiskussisalduse. Neljandas osas on esitatud üks võimalus kuidas hinnanguliselt leida materjali kuivatamiseks kuluvat energiahulka.

Antud töös pole mõõtetulemuste esitamisel ja arvutatud suuruste juures arvesse võetud mõõtemääramatusi, kõik arvulised tulemused on informatiivsed või hinnangulised ning sellisena ei pretendeeri teaduslikus mõttes absoluutsele täpsusele.

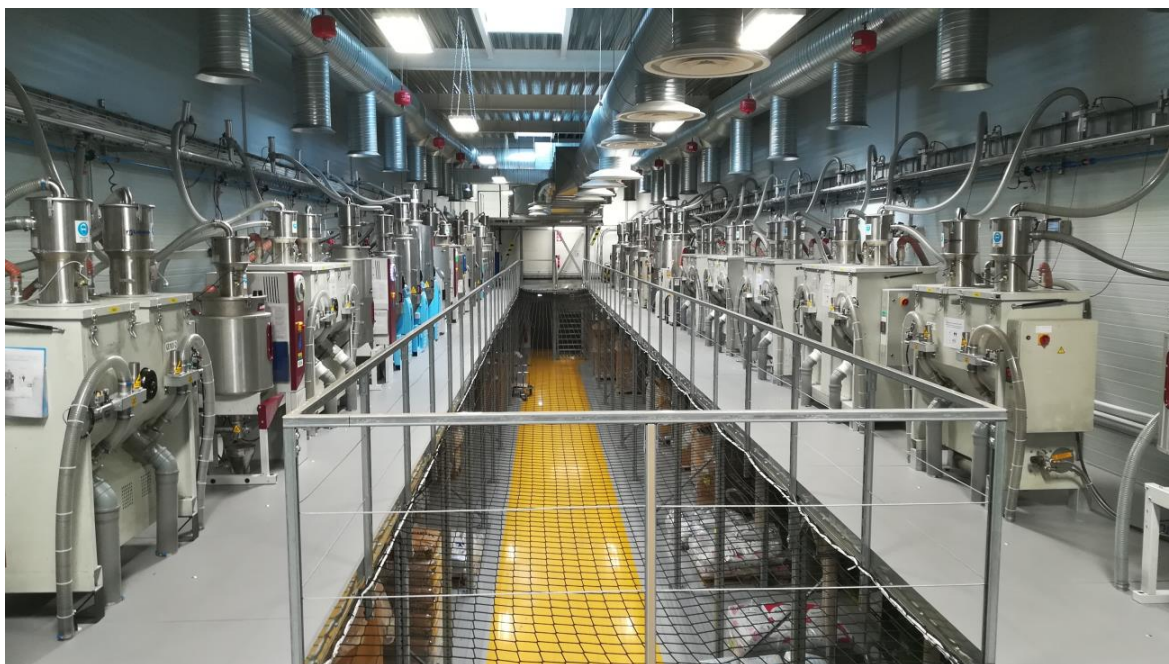
# 1. VALDKONNA ÜLEVAADE

## 1.1. Ettevõtte tutvustus

Promens AS asub Tartumaal Rõngus ja tegeleb plastikust survevalumeetodil toodete valmistamisega, mida tarnitakse peamiselt autotööstusele. Tehase ajalugu ulatub aastasse 1959, plastmasside töötlemisega hakati tegelema aastast 1985. Tehas erastati 1994, aastast 2002 on välisinvesteeringute toel jõuliselt tootmisvõimekust suurendatud, tehase sisseseadet kaasajastatud ning maailmatasemel oskusteavet rakendatud. Põhilised kliendid autotööstuse osas on Volvo Cars, Volvo Trucks ja Scania. Ettevõttes töötab ca 280 inimest, aastane käive on 23 miljonit eurot. Ettevõttes on kasutusel 36 survevalumasinat (joonis 1.1), vormi lukustussurve vahemik ulatub 35-st kuni 1000 tonnini. Materjalide kuivatamiseks on kasutusel 44 kuivatit (joonis 1.2) tootjatelt Gerco, Piovan, Moretto, Labotek ja Wittmann. Erineva nimetusega materjale on üle 150, aasta jooksul kasutatakse tootmiseks ca 3000 tonni polümeere.



**Joonis 1.1.** Ettevõtte tootmishoones olevad survevalumasinad.



**Joonis 1.2.** Materjalidistributsioonis asuvad kuivatid.

## 1.2. Plastikmaterjalide ülevaade

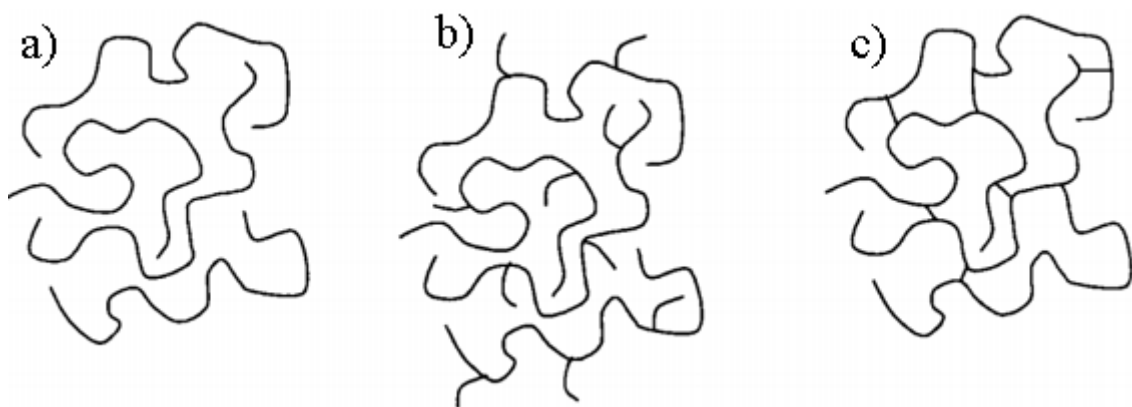
Plastmassideks nimetatakse kõrgmolekulaarsete ühendite baasil valmistatavaid tehismaterjale, mis teatavas töötlemisfaasis on plastsed. Seda omadust kasutatakse nendest soovitava kujuga esemete tootmisel. Enamik plastmasse on keeruka koostisega segud, mille põhikomponent on kõrgmolekulaarne ühend – vaik, mida nimetatakse ka sideaineks. Kõrgmolekulaarsete ühendite molekulmass on väga suur, ulatudes kümnetesse ja sadadesse tuhandetesse, isegi miljonitesse, samal ajal kui tüüpiliste madalmolekulaarsete ainete molekulmass ei ületa paarisada. Kõrgmolekulaarsed ühendid võivad olla looduslikud, tehiskud või sünteetilised, neid kõiki võib üldise nimetusega kutsuda polümeerideks. Sünteetilisel teel saadud polümeere nimetatakse ka plastmassideks, ning plastitööstuses kasutataksegi eelkõige sünteetilisi polümeere, kuna nende omadused on paremad ja valik rikkalikum. Polümeere saadakse kas polümerisatsiooni või polükondensatsiooni teel lähteaine (monomeeri) molekulide liitumisel. [2: 5]

Plastmasse kasutatakse tänapäeval laialdaselt sisuliselt igas eluvaldkonnas ning nad asendavad järjest enam traditsioonilisi materjale nagu metallid, klaas ja puit. Sellise laia leviku põhjuseks on plastide mitmed väga head omadused [9: 40]:



- madalam töötlemistemperatuur kui metallidel ja keraamikal, sellest tulenev madalam energiakulu töötlemisel
- väiksem erikaal
- viimistlemise minimaalne vajadus
- hea töödeldavus
- korrosioonikindlus
- hea tugevuse ja tiheduse suhe (eritugevus)
- hea elektri- ja soojusisolatsioonivõime
- odavus

Plastikuid võib jagada termoplastideks ja termoreaktiivplastideks. Termoplastid koosnevad kas lineaarsete või hargnenud ahelatega polümeeridest (joonis 1.3 a ja b). Enamiku polümeerisatsiooni teel saadud termoplastide põhiline omadus on, et kuumutamisel nad pehmenevad ja muutuvad voolavaks, jahtumisel jällegi tahenevad, ning selliseid kuumutamise- ja jahutamistsükleid on põhimõtteliselt võimalik piiramatult korrata [2]. Polükondensatsiooni teel saadud polümeerid – termoreaktiivid – muutuvad esialgse kuumutamise käigus küll plastseks, kuid edasisel kuumutamisel nende molekulide põhiaahelad ühenduvad omavahel põiksidemetega (joonis 1.3 c), tekib kolmemõõtmeline ruumiline struktuur (nn ristsildumine) ning sellisel kujul muutub materjal jäädavalt tahkeks. Järjekordsel kuumutamisel termoreaktiiv enam vedelaks ei muutu, pikemaajalisel kuumutamisel hoopis degradeerub. [12]



**Joonis 1.3.** Polümeerid: a – lineaarse ahelaga; b – hargnenud ahelatega; c – ruumilise struktuuriga [12: 3].

Survevalutööstuses kasutatavatest plastikmaterjalidest valdav enamus – ca 90% – on termoplastid. [1: 4].

Niiskuse sidumise võime järgi saab plaste jagada ka mittehügrokoopseteks ja hügrokoopseteks. Mittehügrokoopsete plastmasside graanulid niiskust endasse ei tõmba, vaid niiskus koguneb graanuli pinnale. Selliste materjalide kuivatamine on suhteliselt lihtne, tavaliselt piisab ainult kuuma õhuga töötava kuivati kasutamisest, sest pindmine niiskus aurustub suhteliselt kergelt. Mittehügrokoopset materjalid on näiteks PE, POM, PVC, PP, PS, TPE. Hügrokoopsete plastmassid seevastu imavad lisaks pinnaniiskusele ka niiskust graanuli sisse. Nende materjalide kuivatamine on tunduvalt keerulisem, tavalisest kuuma õhuga kuivatamisest üldiselt ei piisa ning kasutada tuleb spetsiaalset kuiva õhuga töötavat kuivatit. Hügrokoopset materjalid on näiteks ABS, PA, PBT, PC, PET, PMMA, SAN, CA, PUR. [1]

Termoplastseid polümeere saab jagada veel amorfseteks ja poolkristallilisteks. Amorfset polümeerid sulavad soojendamise käigus sujuvalt, neil puudub kindel sulamistemperatuur, jahtumisel muutuvad polümeeriahelad aeglaselt tahkeks, paigutudes ebakorrapäraselt. Poolkristallilised polümeerid sulavad kiirelt suhteliselt kindlal temperatuuril, selle omaduse tõttu on neid võrreldes amorfsete polümeeridega lihtsam töödelda. Jahtumise käigus tahkestudes paigutub osa polümeeriahelaid ebakorrapäraselt, kuid ülejäänud polümeeriahelad moodustavad kristallilisi struktuure. Sel põhjusel on poolkristallilised polümeerid tavaliselt tugevamad ja jäigemad kui amorfset polümeerid. [5: 10]

### **1.3. Mõningaid ettevõttes kasutatavaid polümeere**

**PP** – polüpropüleen – laialt kasutatav poolkristalliline polümeer. PP on vastupidav ja sitke plastik, millest on teatud juhul võimalik valmistada hingedega tooteid. Väga hea elektri isoleerimisvõime, madal vee sidumisvõime, ei ole mürgine, madalatel temperatuuridel löögikindlus kannatab, halvasti liimitav. Kuna tegemist on mittehügrokoopse materjaliga siis enne tootmist üldiselt kuivatamist ei vaja, halbade hoiutingimuste korral kui on tuvastatud niiskumine võib kuivatada 80..90 °C juures 1..2 h. Taaskasutuse käigus

polüpropüleenil omadused oluliselt ei muutu, seega on võimalik kvaliteetseid tooteid toota 100% ulatuses taaskasutatud materjalist. [1, 5, 11]

**PS** – polüstüreen – odav amorfne polümeer, väga hea läbipaistvusega, kõva, jäik ja kergesti purunev. Madal vee sidumisvõime, hea värvitavus, lõhnatu, maitsetu. Mittehügrokoopne, enne tootmist kuivatamist ei vaja, kui halbade hoiutingimuste korral on siiski niiskunud, siis tuleks kuivatada 80 °C juures 1h. Taaskasutuse käigus materjali omadused oluliselt ei muutu, võib toota 100% ulatuses taaskasutatud materjalist. [5, 11]

**PA 6 ja PA 6.6** (kirjutatakse ka PA 6/6 ning PA 66) – polüamiidid, tuntud ka kui nailon – väga levinud poolkristallilised tehnoplastid. Kui lõpptoodete niiskussisaldus on 2..3%, siis on nad väga sitked ja vintsked ning abrasioonile vastupidavad, heade libisemisomadustega, kuivalt seevastu on haprad. Hea värvitavus, liimitav, ei ole mürgine. Väga hügrokoopne, võimaluse korral säilitada kinnistes anumates, vältida kokkupuudet välisõhuga. Kuivatada 80 °C juures 4h. Lubatud niiskussisaldus sõltuvalt konkreetsest margist on 0,05..0,2%. Taaskasutatud materjali osakaal võib olla kuni 10%, tähelepanu tuleb pöörata taaskasutatava materjali hoolikale kuivatamisele. [1, 5, 11]

**PBT** – polübutüleen-tereftalaat – poolkristalliline polüester, omadustelt sarnane polüamiidile, kuid imab vähem niiskust. Hea kuumuskindlusega, tugev, kõva, heade libisemisomadustega. Kasutatakse lisaks autotööstusele laialdaselt ka elektriisolaatorina. Hügrokoopne, väga tundlik niiskuse suhtes, kuivatada võib 120 °C juures 2..4h. Maksimaalne lubatud niiskussisaldus on 0,03%. Taaskasutatud materjali osakaal võib olla kuni 10%, juhul kui see on kuivatatud nõutud tasemeni. [1, 5, 11]

**ABS** – akrüülniitril-butadieen-stüreen – amorfne kopolümeer, koosneb kolmest nimes mainitud polümeerist. Talub hästi temperatuurikõikumisi, olles sitke isegi -40 °C juures, pehmenemine algab 100 °C juures; kõva, madal vee sidumisvõime, pinda on võimalik galvaaniliselt töödelda, hea leegiaeglustusvõimega. Vähese ilmastikukindlusega. Hügrokoopne, vajadusel kuivatada 80 °C juures 3h. Maksimaalne lubatud niiskussisaldus on 0,2%. Taaskasutatud materjali osakaal võib olla kuni 30%, korduval taaskasutusel materjali tehnilised näitajad halvenevad oluliselt. [1, 5, 11]

**PC** – polükarbonaat – amorfne polümeer, millel on suurepärane löögisitkus, jäikus ja läbipaistvus, seetõttu kasutatakse seda materjali laialdaselt näiteks kaitseprillide valmistamiseks. Hügrokoopne, kuivatada 120 °C juures 4h. Maksimaalne lubatud

niiskussisaldus on 0,02..0,04% . Taaskasutatud materjali sisaldus võib olla kuni 10% . [1, 5, 11]

**POM** – polüoksümetüleen – poolkristalliline polümeer, kulumiskindel, väikese hõõrdeeguriga ja veeimavusega, pole mürgine, suure kõvaduse ja tugevusega (need omadused säilivad temperatuurini 120 °C). Mittehügrokoopne, üldjuhul kuivatamist ei vaja, kui halbade hoiutingimuste korral on siiski niiskunud, siis kuivatada 100 °C juures 4h. Maksimaalne lubatud niiskussisaldus on 0,1%. Võimalik taaskasutada 100% ulatuses. [1, 11]

**TPE** – termoplastelastomeer – amorfne kopolümeer, koosneb termoplastist ja elastomeeridest. Pehme ja painduv, löögikindel, purunematu, madal vee imamisvõime. Kasutatakse tihendite jms valmistamiseks. Mittehügrokoopne, üldiselt vajab kuivatamist ainult erijuhtudel, sel juhul kuivatada 80 °C juures 4h. Maksimaalne lubatud niiskussisaldus on 0,1%. Taaskasutatud materjali osakaal võib olla kuni 20%. [1, 5, 11]

Niiskussisaldus materjalides antakse tavaliselt kuivaine baasil [10: 352, 13: 982].

## 1.4. Lisa- ja abiained plastides

Lisa- ja abiained võib jagada kasutusviisi järgi kaheks – juba materjalitootja juures lisatud abiained ning survevaluettevõttes lõpptoota valmistamise käigus lisatavad ained.

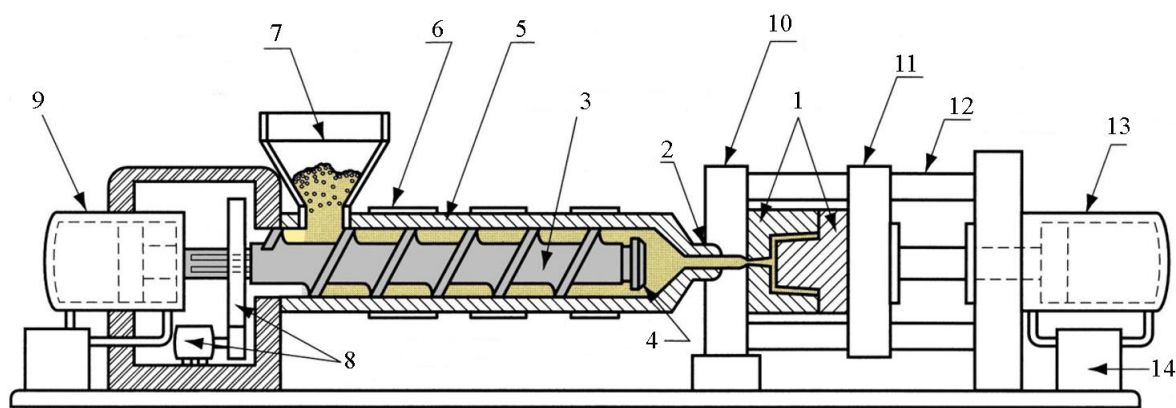
Esimesse gruppi kuuluvate lisandite eesmärgiks on materjali füüsikaliste, mehaaniliste või elektriliste omaduste modifitseerimine, termo- ja valguskindluse suurendamine, töödeldavuse parandamine, värvuse, läbipaistvuse jt optiliste omaduste muutmine, aga ka hinna alandamine [9: 40]. Suhteliselt levinud lisandina väärib eraldi äramärkimist klaasfiiber, mida materjalile lisatuna tähistatakse lühendiga GF (*glass filled*) ning millele järgnev arv näitab protsentides klaasi osakaalu materjalis. Klaaslisandiga plastikud on tunduvalt tugevamad ja jäigemad kui tavalised, ilma sellise lisandita materjalid.

Teise gruppi kuuluvad eelkõige värvained (nn *masterbatch*), mida lisatakse põhimaterjalile paari protsendi ulatuses ja mis võimaldab saavutada lõpptoota soovitud värvitooni. Kuigi värvaine osakaal on kõigest 1-2%, võib ka sellel olla lõpptoota kvaliteedile otsustav mõju.

Seega isegi kui materjal on korrektselt kuivatatud, kuid värvaine ei ole, siis võib värvainega lisandunud niiskus lõpptoote kvaliteedile ikkagi halvasti mõjuda. Seega on teatud juhtudel oluline kontrollida ka värvainete niiskussisaldust ning vajadusel neid kuivatada.

## 1.5. Survevaluprotsess

Survevaluprotsessiks nimetatakse plastmassist toodete valmistamist survevalumeetodil. Survevalumasina põhimõtteskeem on esitatud joonisel 1.3. Protsessi lühike kirjeldus materjali liikumise järgi: materjalidistributsioonis valmistatakse materjal ette, see tähendab et laetakse kas kottidest või nn oktabiinist (euroalusel olev pakend, mis sisaldab kuni 1200 kg materjali) vaakumtrassi abil kuivatisse. Peale materjali kuivatamist liigub see järgmise vaakumtrassi kaudu survevalumasina materjalipunkrisse 7 (joonis 1.4). Punkrist liigub materjal valusilindrisse 5, kus asub kruvi 3 (nimetatakse ka teoks). Kruvi pöörlemise tulemusel liigub materjal mööda valusilindrit 5 edasi. Silindri ümber on küttekeha 6, mis annab osa materjali voolavas olekusse viivast soojusest; enamust soojusest – kuni 80% – tuleb kruvi poolt tekitatud survest ja hõõrdejõust. Voolavas olekus toimuv segunemine tagab homogeensuse nii materjali enda kui ka lisandite (nt värvaine) suhtes ning lisaks sellele ühtlase temperatuuri kogu materjali ulatuses.



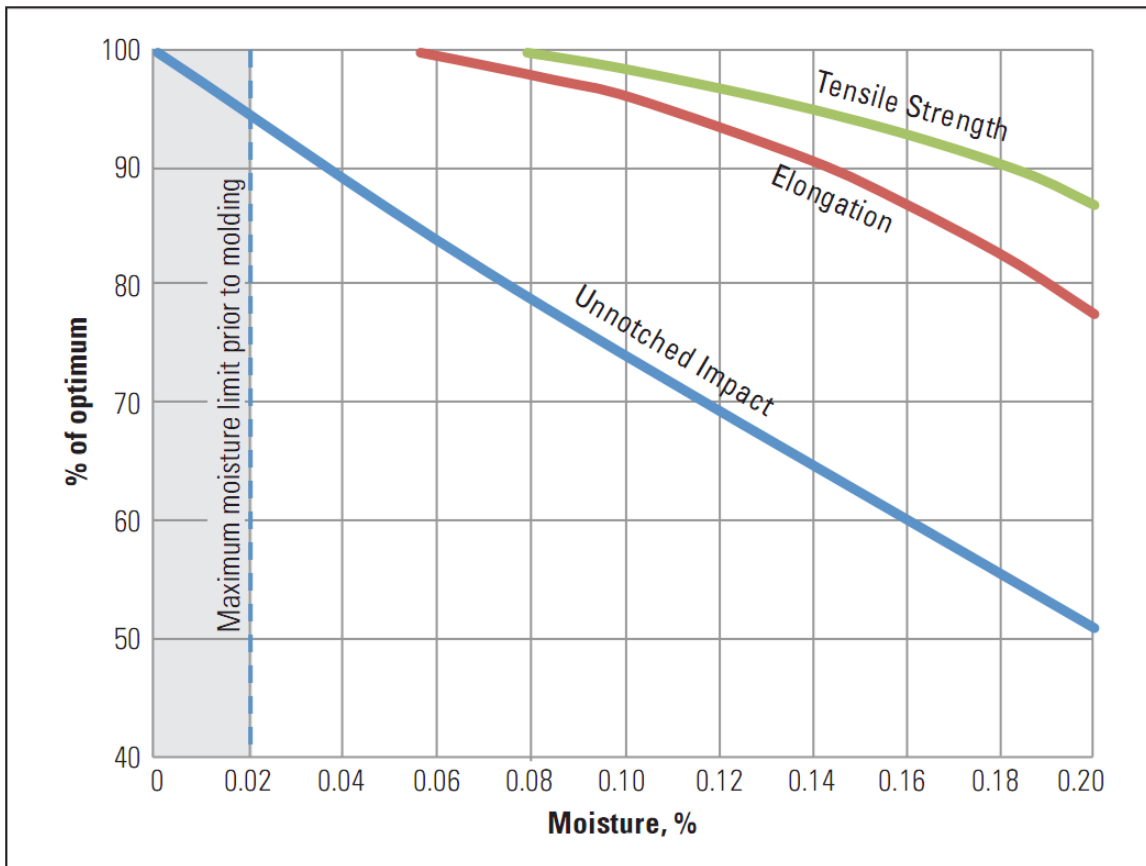
**Joonis 1.4.** Survevalumasina lihtsustatud skeem: 1.Vorm 2.Suuline 3.Kruvi 4. Klapp (*Nonreturn valve*) 5.Valusilinder 6. Silindri küttekeha 7.Materjalipunker 8.Kruvi mootor ja reduktor 9.Valusõlme hüdrocilinder 10.Statsionaarne vormilaud 11.Liikuv vormilaud 12.Vormilaua juhtvarvad (*Tie rods*) 13.Vormi hüdrocilinder 14.Vormisilindri hüdropump [15].

Silindris ettevalmistatud materjal surutakse hüdrosilindri 9 mõjul kiiresti läbi suulise 2 ja valukanali vormi 1, kus peale vormi täitumist algab materjali jahtumine ja tahkestumine. Järgmise sammuna liigub kruvi hüdrosilindri 9 abil tagasi ning hakkab ette valmistama järgmist materjalikogust (nn lask); kui vormis olev materjal on tahkestunud ning toode on moodustunud, liigub vormi templipool 11 hüdrosilindri 13 mõjul matriitsist 10 eemale – vorm avaneb ning valmistoode saab vormist eralduda. Peale toote eraldumist liigub vorm hüdrosilindri 13 abil jälle kokku, samal ajal on silindris valminud uus kogus vedelat materjali ning kogu tsükkel hakkab algusest peale. [1, 2]

## 1.6. Liigniiskuse mõju plastikule

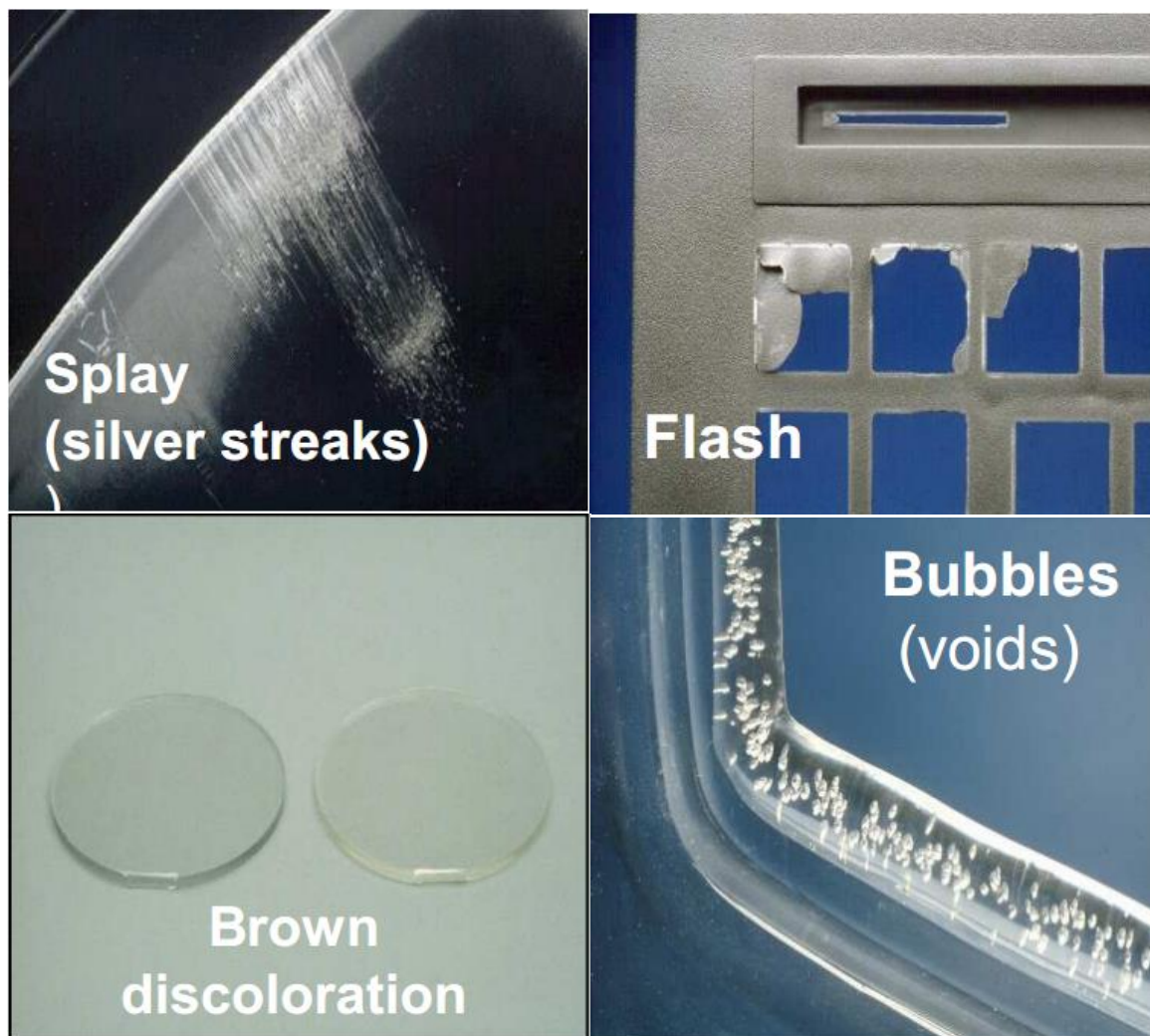
Kõik plastikud, nii esmakordselt kasutatavad (*virgin*) kui ka taaskasutatavad (*regrind*), on mingil määral töötlemise käigus mõjutatavad oma niiskussisaldusest. Isegi minimaalne niiskussisaldus võib teatud tingimustel muuta lõpptoote mehaanilisi, füüsikalisi, visuaalseid ja muid omadusi, veidi teistel tingimustel ei pruugi samal niiskusel jällegi mingeid kahjulikke mõjusid olla – väga palju sõltub igast konkreetsest olukorrast [1:895].

Kui materjali niiskussisaldus on liiga suur, siis survevalumasinas materjali temperatuuri tõstmisel see vesi aurustub ning hakkab polümeeriga reageerima – tekib hüdroolüüs, mis tähendab, et keemilise reaktsiooni käigus lõhustuvad aine molekulide sidemed veemolekulidega ühinedes. Vesi, tungides polümeerahelasse, purustab selle, ning sellest tulenevalt lühema polümeerahelaga tooted kaotavad olulisel määral oma sitkust ja purunevad kergemini. Selline protsess võib toimuda valamise käigus väga kiiresti ning tegemist on mittepöörduva protsessiga, ehk selliselt toodetud praaktooteid ei saa enam taaskasutada. Joonisel 1.5 on näitlikustamiseks kujutatud klaasfiibriga armeeritud PET materjali löögi- ja tõmbetugevuse ning katsekeha tõmbamiskatsel pikenemisvõime sõltuvus materjali niiskussisaldusest – kõik kolm omadust, eelkõige löögitugevus halvenevad oluliselt kui materjali niiskussisaldus ületab lubatud piiri. [1]



**Joonis 1.5.** PET+GF mehaaniliste omaduste sõltuvus niiskussisaldusest. *Unnotched Impact* – löögitugevus; *Elongation* – katsekeha pikenemine; *Tensile Strength* – tõmbetugevus [17].

Lisaks mehaaniliste omaduste halvendamisele võib liigne niiskus materjalis tekitada ka visuaalseid defekte, nagu näiteks läbipaistmatus, mullid, põletusjäljed, värvimuutus, vahelejooksud, nähtavad liitejooned ja poorsus [6: 3]. Selliste nähtuste tekkepõhjuseks on kõrge rõhu ja temperatuuriga veeauru sattumine valamise käigus survealuvormi koos materjaliga. Illustreerimiseks on joonisel 1.6. toodud mõningad sellised visuaalsed probleemid.



**Joonis 1.6.** Liigsest niiskusest põhjustatud visuaalsed kvaliteediprobleemid: hõbedased viirud, vahelejooksud, värvimuutus, mullid [6].

### 1.7. Energiasäästu meetmed ettevõttes

Plastmasside survevalu käigus tuleb vormi pressitud kuuma materjali kiiresti jahutada, saavutamaks optimaalne vahetamine tsükliaja, toodangumahu ja lõpptoota kvaliteedi vahel. Vormijahutuseks kasutatakse vett ja selle protsessi käigus tekib arvestatavas koguses jääksoojust. Selle soojuse ära kasutamiseks on paigaldatud ONI soojusvaheti – vormijahutusvesi asub omaette kinnises veevõrgus, soojusvaheti kaudu liigub soojus järgmisesse veevõrku, mis läbi katlamajas oleva soojusvaheti on ühendatud kogu tehase küttesüsteemiga (küttesüsteemi jaoks on katlamajas 700 kW gaasikatel). Jahutusveest saadav soojus on piisav, et külmal ajal anda umbes pool kogu kontorite, ladude,



tootmisruumide jt ruumide soojusvajadusest. Soojemal ajal katab jahutusveest saadav soojus kogu tehase soojusvajaduse ning katelt polegi vaja tööle rakendada.

Jääksoojust tekib ka materjalide kuivatamise käigus. Kuigi kuivatid töötavad suletud ringluse põhimõttel (lähemalt vt järgmine peatükk), eraldub siiski kuivatite pindadelt ja absorptsioonikolonnide regeneratsiooni käigus piisavalt soojust, et materjalidistributsiooni ruum muutuks ülejäänud ruumidest märgatavalt soojemaks. See soojus kasutatakse läbi materjalidistributsioonis oleva õhksoojusvaheti ära kõrvalolevate laoruumide kütteks.

Materjalide kuivatamine on suhteliselt energiakulukas protsess, näiteks kulub ca 10% kogu tehases kulutatavast võimsusest materjalidistributsiooni käitamiseks, sellest omakorda suurema osa moodustab justnimelt kuivatitele kuluv elektrienergia. (Näiteks 17.07.2019 kell 15:00 töötas materjalidistributsioon võimsusega ca 90 kW, kogu tehase võimsustarve samal ajal oli ca 820 kW).

Kirjeldatud meetmed annavad arvestatava osa energia kokkuhoius ning vastavate seadmete paigaldamistele tehtud investeeringud on end paari aastaga ära tasunud. Loomulikult on uute energiasäästuvõimaluste leidmine ettevõttes pidev protsess ning pädevatest töötajatest koostatud meeskond otsib pidevalt võimalusi kuidas tehase energiakasutust veelgi efektiivsemaks muuta.

## 2. PLASTIDE KUIVATAMISE KIRJELDUS

### 2.1. Kuivatamise põhialused

Kuivatamine on toiming, millega vähendatakse materjali niiskust [3: 6]. Niiskuse vähendamist saab läbi viia kas mehaanilise, füüsikalise-keemilise või soojusliku kuivatamisega [3: 7], plastmasside kuivatamisel kasutatakse tavaliselt kombinatsiooni füüsikalise-keemilisest ja soojuslikust kuivatamisest, soojust kantakse materjalile edasi konvektiivselt ning kuivatusagensiks on soe kuiv õhk. Kuivatamise käigus liigub niiskus keha sisemusest välispinnale ja sealt edasi väliskeskkonda (kuivatusõhku), see protsess toimub juhul kui veeauru osarõhk kuivatatava keha piiril on suurem kui kuivatusõhus [3: 9]. Auru rõhugradient põhjustab ka kehas niiskuse liikumise seest välja (sisemine difusioon), rõhuvahe saadakse kuiva õhu kasutamisega ja keha soojendamisega [8: 325].

### 2.2. Plastmasside kuivatamise iseärasused

Plastmasside kuivatusprotsess toimub kahes osas – kõigepealt tuleb graanuleid kuumas õhus piisavalt kaua üles soojendada, kuni veemolekulid graanulis vabalt liikuma saavad hakata, ja siis tuleb kuuma ja kuiva õhu voolu piisavalt kaua hoida, kuni veemolekulid graanuli sisemusest välispinnale jõuavad liikuda, samas tuleb silmas pidada et kuivatusõhu temperatuur ei oleks liiga kõrge, hoidmaks ära plastmassi degradeerumisprotsessi.

Erinevalt enamusest orgaanilistest ainetest on plastmasside niiskussisaldus suhteliselt madal, nõuetekohane niiskussisaldus jääb hügrokoopsetel plastidel tavaliselt vahemikku 0,02..0,2%, ning see asjaolu seab plastikuivatitele teatud erinõudeid. Põhiline neist on, et kuivatusõhk peab olema väga kuiv; plastitööstuses kasutatakse õhu kuivuse ja kuivati kuivatusvõime hindamiseks laialdaselt **kastepunkti** (*dew point*) mõistet. Kastepunktiks nimetatakse temperatuuri, mille juures õhus olev veeaur hakkab kondenseeruma, ning madala kastepunkti ja kõrge õhutemperatuuri kombinatsioon loob olukorra (nn *pressure-dewpoint differential*), kus piltlikult öeldes vesi „keeb“ plastigraanulist välja [1].

Hügrokoopsete plastmasside kuivatamisel peab kuivatusõhu kastepunkt olema vähemalt -20 °C, kaasaegsetel kuivatitel on see isegi -65 °C [14].

Kui esmakordselt kasutatava plastiku kuivatamine on materjalitootja poolt ettenähtud tingimusi – nagu näiteks temperatuur, aeg ja kastepunkt – järgides võrdlemisi triviaalne tegevus, siis taaskasutatavate (purustatud jäätmed ja praaktooded, nn „puru“) kuivatamine on üldjuhul tunduvalt keerulisem. Seda tavaliselt põhjusel, et purustatud materjale ladustatakse suhteliselt pikka aega mittehermeetiliselt jahedas laoruumis ning materjalil on piisavalt aega saavutada oma küllastusniiskuse. Lisaks kui materjal on purustatud väga peeneks (sisuliselt tolmusarnaseks), siis võib kuivatamisel vastuvõetava niiskussisalduse saavutamine olla kas sisuliselt võimatu või võib kuivatusaeg olla ebapraktiliselt pikk (>12 h).

### **2.3. Plastmasside ülekuivatamine**

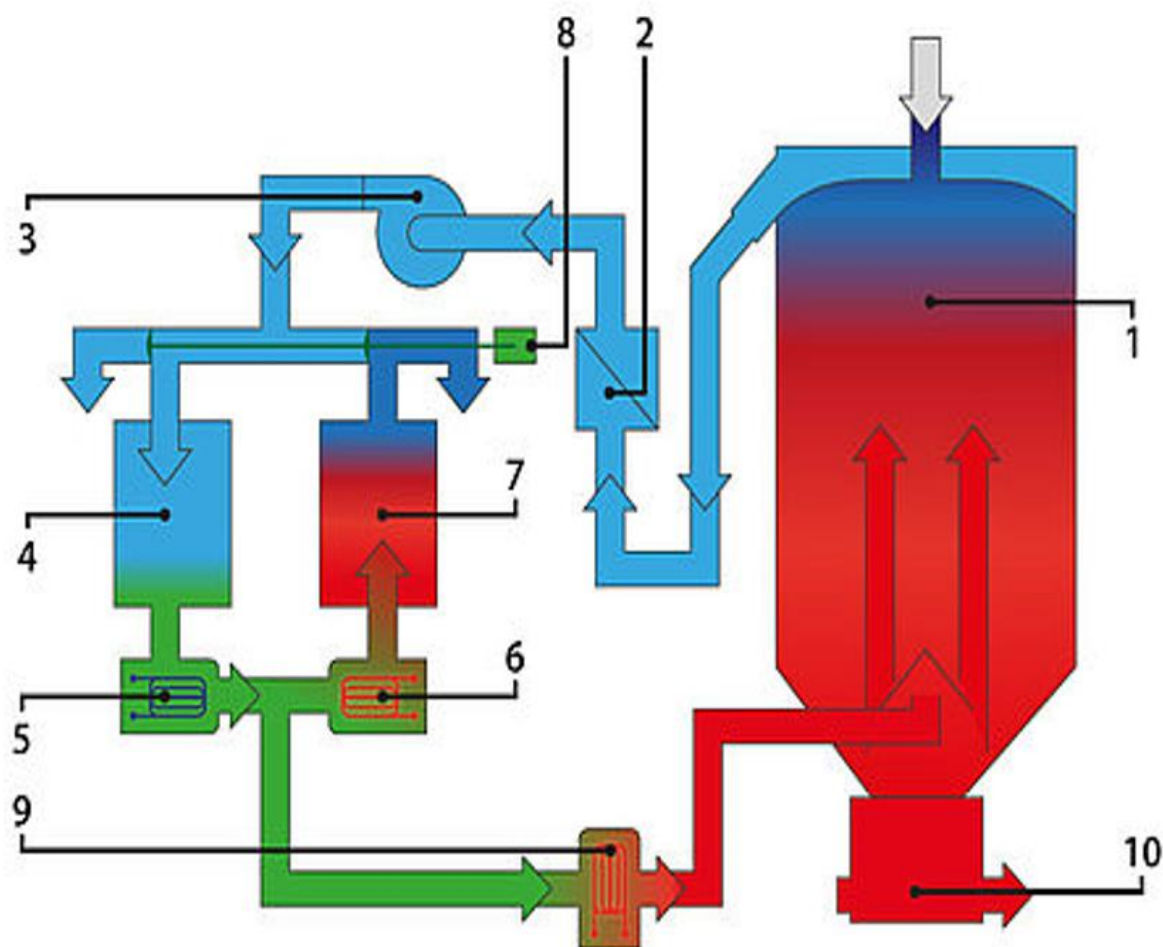
Laialt levinud arvamuse kohaselt on plastmasside ülekuivatamine samuti mittesoovitav, kuna see toob esile omakorda kvaliteediprobleeme, näiteks toodete hapruse, värvimuutuse ja raskendab toodete täisvalamist. Siiski tuleb märkida, et antud juhul pole otseseks põhjuseks mitte plastiku liiga madal niiskussisaldus, vaid liiga kuiva plastiku viskoossus suureneb märgatavalt, ning sellist plastikut on olemasolevate protsessiparameetrite korral raskem vormi pressida, see omakorda põhjustab täisvalamatust ehk olukorra kus kogu vorm pole materjaliga ettenähtud aja jooksul jõudnud piisavalt täituda ning toode jääb „poolikuks“. Hoopis suurem probleem on siis, kui kuivatusaega kiirendada üritades on tõstetud kuivatusõhu temperatuuri lubatust kõrgemale. Kuumemas õhus tõepoolest materjal kuivab kiiremini, kuid liigse kuumuse käes (isegi kui materjal veel sulama ei hakka) tekib oksüdeerumisprotsess ning polümeerid degradeeruvad, tuues endaga kaasa värvuse muutuse esialgu kollakamaks ja edaspidi pruunikaks. Samuti muutuvad tooted sellisel juhul hapraks, kaotavad oma löögitugevuse ja purunevad kergemini. Seega igal juhul tuleks vältida kuivatamist lubatust kõrgema temperatuuriga; samuti pole energia kokkuhoidu silmas pidades mõtet lubatud temperatuuril materjali liiga kaua kuivatada. [16]

## 2.4. Kuiva õhu kuivati tööpõhimõte

Mittehügrokoopsete plastikute kuivatamiseks piisab tavalisest kuumast õhuga kuivatist, kuid hügrokoopsete materjalide kuivatamiseks tuleb kasutada nn kuiva õhu kuivateid (*dry air dryer, dehumidifying dryer*). Seda tüüpi kuivateid võib nimetada ka sorptsioonkuivatiks [4] ning need on hetkel kõige laialdasemalt levinud kuivatid plastitööstuses. Sellise kuivati põhimõtteskeem on toodud joonisel 2.1.

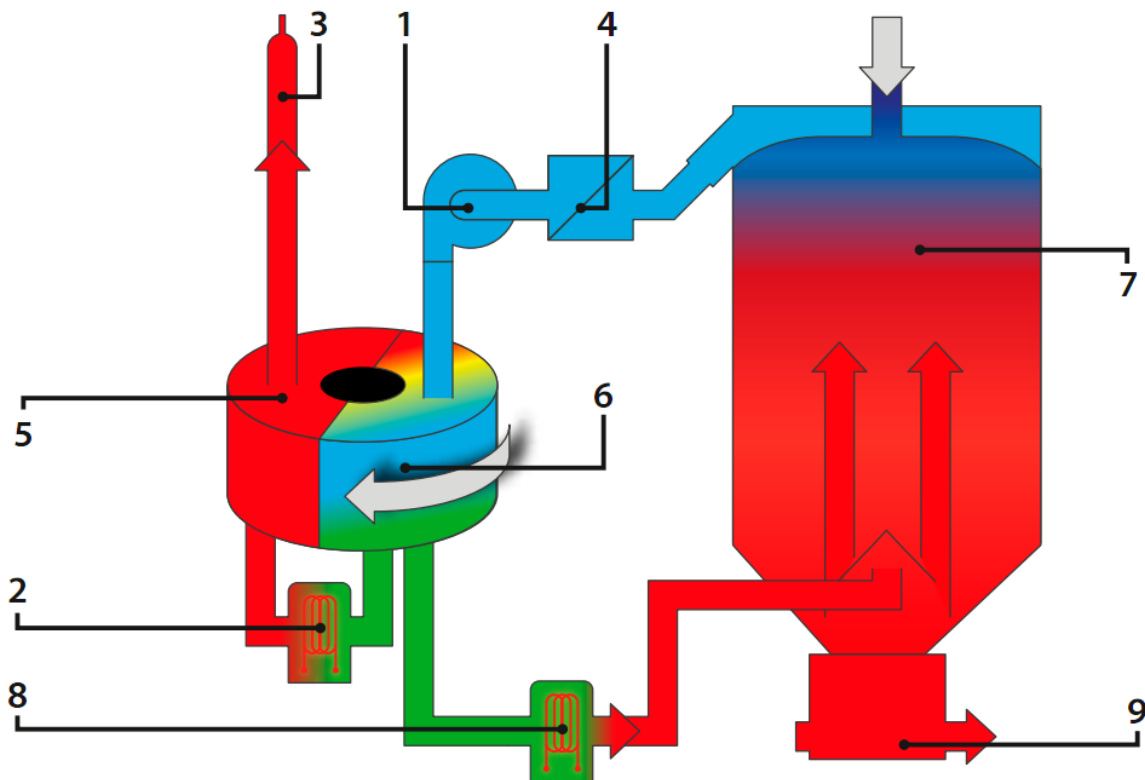
Kuivati koosneb materjalipunkrist 1, kuhu ülevalt kantakse vaakumtrassi abil automaatselt uut kuivatamata materjali peale. Ventilatori 3 abil pannakse kinnises süsteemis kuivatusõhk ringlema, punkrist tulles läbib „märjast“ materjalist niiskunud õhk tolmufiltrit 2 ning liigub edasi absorptsioonikoloni 4 (nimetatakse ka molekulaarkärjeks), milles olev väga hügrokoopne absorbent – silikageel – kuivatab läbivat õhku sellest veeauru sidudes. Järgmiseks liigub õhk küttekehani, kus toimub õhu kuumutamine kuivatamiseks vajaliku temperatuurini; kuum ja kuiv õhk liigub edasi materjalipunkrisse, kus toimubki materjali kuivatamine ning kogu protsess hakkab otsast peale.

Absorptsioonikolonne on sellises kuivatis kaks. Kui üks on rakendatud kuivatusõhu kuivatamiseks, siis teises toimub samal ajal regeneratsiooniprotsess – see tähendab, et küttekeha 6 abil tõstetakse koloni temperatuur ca 200 °C-ni ning silikageeli poolt eelnevalt absorbeeritud niiskus tõrjutakse kuivatist välja. Regeneratsioonitsüklite vahetamine absorptsioonikolonide vahel toimub automaatselt, sellised tsükleid võib toimuda tuhandeid enne kui silikageel on vananemise tõttu vaja värskega asendada.



**Joonis 2.1.** Kuiva õhu kuivati ülevaade: 1.Materjalipunker 2.Kuivatusõhu filter 3.Kuivatusõhu ventilaator 4.Esimene absorptsioonikolonn 5.Esimene regeneratsiooni küttekeha 6.Teine regeneratsiooni küttekeha 7.Teine absorptsioonikolonn (hetkel regeneratsioonifaasis) 8.Üleminekuklapp 9.Kuivatusõhu küttekeha 10.Kuivatatud materjali väljund. [14]

Joonisel 2.2 on kujutatud eelnevaga sarnast kuivatit, millel kahe absorptsioonikolonn asemel on üks pöörlev silikageeliga trummel. Sellised kuivatid, olles uuemat tüüpi, võimaldavad paremini kontrollida kastepunkti ning töötavad energiasäästlikumalt [14].



**Joonis 2.2.** Trummel-tüüpi molekulaarkärjega kuiva õhu kuivati. 1.Kuivatusõhu ventilaator 2.Regeneratsiooni küttekeha 3. Soojusvaheti 4.Kuivatusõhu filter 5. Absorbtsioonitrummel, regeneratsioonifaas 6. Absorbtsioonitrummel, õhu kuivatuse faas 7.Materjalipunker 8.Kuivatusõhu küttekeha 9.Kuivatatud materjali väljund. [14]

Lisavarustusena saab kaasaegsetele kuivatitele paigaldada kastepunkti sensori. See sensor jälgib pidevalt punkrist tuleva õhu kastepunkti ja vastavalt sellele reguleerib kuivati tööd. Kui väljuva õhu kastepunkt on võrdne punkrisse mineva õhu kastepunktiga, siis see tähendab et punkris olev materjal on saavutanud antud tingimustele vastava tasakaaluniiskuse, edasist kuivamist enam ei toimu ning kuivati juhtsüsteem saab energia kokkuhoiu eesmärgil vähendada punkrit läbiva õhu hulka ning temperatuuri. Kui punkrisse satub niiskem materjal, tõuseb ka väljuva õhu kastepunkt ning kuivati peab tõstma kuivatusõhu vooluhulka ja temperatuuri.

## 2.5. Kuivati Gerco TTM-2/200E

Üheks tüüpiliseks ettevõttes kasutatavatest kuivatitest on Gerco TTM-2/200E (joonis 2.3).



**Joonis 2.3.** Kahe punkriga kuuma õhu kuivati Gerco TTM-2/200E.

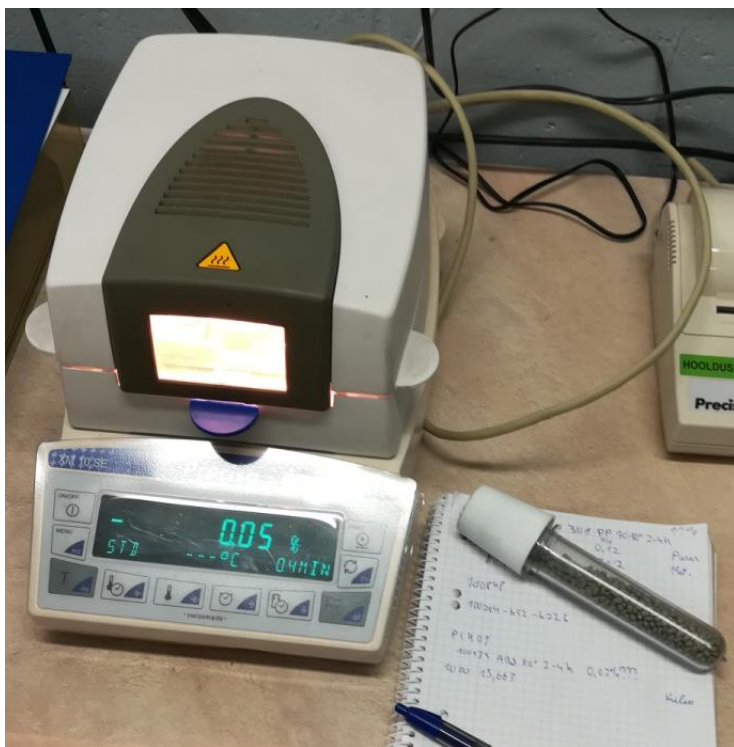
Tegemist on kahe materjalipunkri ja kahe absorptsioonikolonniga kuiva õhu kuivatiga, mille materjali kuivatustootlikkus on 22..65 kg/h. Mõlema punkri maht on 200 l. Kuivati töötemperatuur on seadistatav vahemikus 60..160 °C, kuivatamisel on võimalik materjali niiskussisalduseks saavutada <0,02 %. Kuivati nimivõimsus on 16 kW, see koosneb regeneratsiooni küttekeha (3,5 kW), kuivatusõhu küttekeha (11 kW) ja ventilaatori võimsusest (1,5 kW). Tarbitav pinge on 3x400 V, nimivoolutugevus 31,5 A. [24]

### 3. KATSEMÕÕTMINE

#### 3.1. Plastiku niiskussisalduse mõõtmine

Plastmasside niiskussisalduse täpseks mõõtmiseks kasutatakse Karl Fischeri tiitrimist, kuid kuna see meetod on suhteliselt ajakulukas ning kättesaadav eelkõige hästivarustatud laboratooriumitele, siis plastitööstuses on eelkõige levinud niiskussisalduse mõõtmine analüütilisel teel. Selle meetodi puhul on tegemist sisuliselt kaaluga, kus mõõdetakse niiske proovi esialgne mass, siis kuumutatakse proovi piisavalt kaua et aurustada kogu proovis olev niiskus, mõõdetakse kuivatatud proovi mass ning nende masside vahe järgi arvutatakse algse proovi niiskussisaldus.

Antud töös kasutati materjalide niiskussisalduse mõõtmiseks termogravimeetrit Precisa XE 10 SE (joonis 3.1). Seadme loetavus on 0,001 g, kaalumispirkonna ulatus ehk lubatud proovi mass on 0,2..100 g, kuivatusagregaadi temperatuur on reguleeritav 1 °C kaupa piirides 30..230 °C ning seadme mõõtemääramatus on  $\pm 0,01\%$ . Kuivatusagregaadi küttekehaks on halogeenlamp.



**Joonis 3.1.** Materjaliproovi niiskussisalduse mõõtmine termogravimeetriga.



Analüütilise mõõtmise üheks oluliseks puuduseks on asjaolu, et kuumutamise käigus ei pruugi proovist eralduda ainult veeaur, vaid ka muud lenduvad ained, mida otseselt niiskuseks pidada ei saa. Sel juhul ei pruugi niiskussisalduse mõõtmise tulemused olla usaldusväärsed, sest mõõteriist näitab suuremat niiskussisaldust kui tegelikult materjalis on. [16]

### **3.2. Mõõtemetoodika**

Kuna hügroσκοopsed plastid niiskuvad suhteliselt kiiresti ümbritseva õhuga kokku puutudes, tuleb katsete läbiviimisel hoolikalt jälgida et kokkupuude tavaõhuga oleks minimaalne. Sel põhjusel kasutatakse proovide võtmiseks ja mõõteseadme juurde transportimiseks õhukindlalt korgiga suletavaid katseanumaid. Ühtlasi ei tohiks proovi võtmise ja mõõtmise vaheline aeg olla pikem kui paar minutit, sest vastasel korral jõuab proov katseanumas maha jahtuda, anuma avamisel hakkab ümbritsevas õhus olev niiskus kiirelt kondenseeruma kuivatatud graanulite pinnale, mõjudes samuti mõõtetäpsusele negatiivselt.

Korrektse proovi võtmiseks tuleb avada kuivati materjalipunkri põhjas olev siiber ja lasta kuivaval materjalil punkrist välja langeda, oodata kuni umbes 2..4 kg materjali on väljunud, siis vähemalt kolm korda katseanum materjaliga täita ja koheselt tühjendada, eesmärgiga anumad soojendada ja vähendada selles oleva niiske õhu osakaalu. Kui soovitud proov on olemas, tuleb katseanum koheselt korgiga õhukindlalt sulgeda.

Niiskussisalduse mõõtmiseks tuleb mõõteriist nullida, seadistada sobiv kuivatustemperatuur, paigutada proovi graanulid ühtlaselt mõõtepannile, jälgides et proovi mass ei ületaks lubatud piire, ning käivitada mõõteprotsess. Tavaliselt kestab mõõtmine paar minutit.

Järgneva katsetulemusi vaadeldes tuleb silmas pidada, et kuna kõik mõõtmised tehti tööstusliku tootmise tingimustes, siis sellest lähtuvalt oli sobivate materjalide ja kuivatite valik suhteliselt piiratud – näiteks toimusid kuivatite käivitused ebasobival ajal, kasutati ebasobivaid materjale või polnud kuivatite ehituslike iseärasuste tõttu võimalik proove võtta. Tootmise mittesegamise eesmärgil polnud otstarbekas lihtsalt niiskussisalduse mõõtmise eesmärgil ühtegi kuivatit niisama tööle panna.

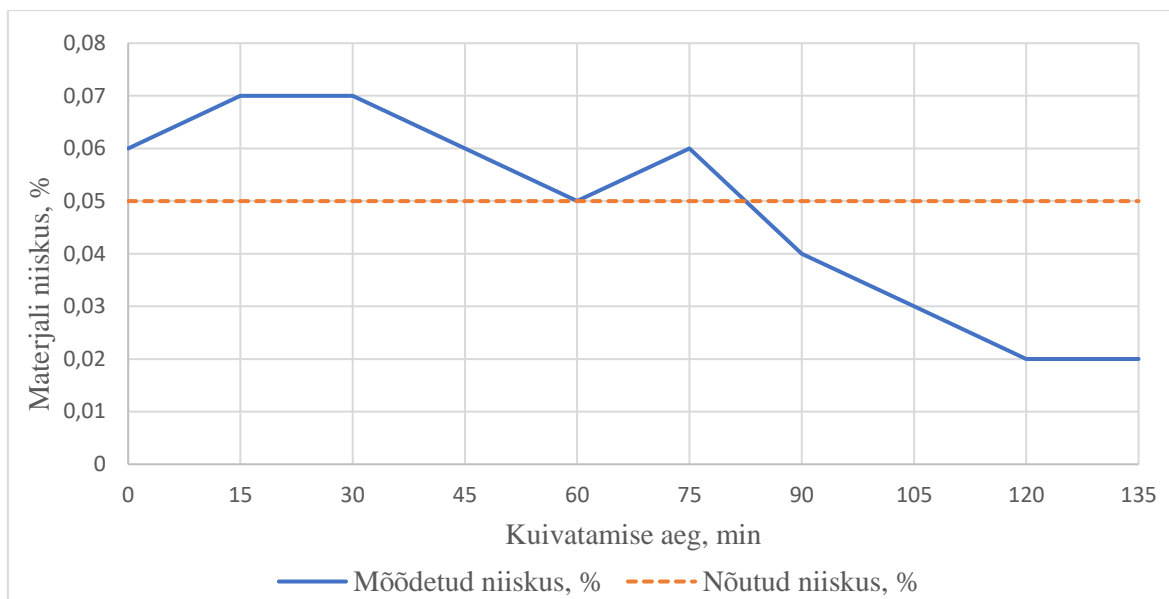
### 3.3. Mõõtetulemused

Materjal ettevõttesiseses artiklinumbriga **100222** – tootja DuPont, mark „Zytel FR72G25V0 NC010“, armeeritud 25% klaasfiibriga, kuulub PA 6/6.6 perekonda, väga hügrokoopne. Tootjapoolsed kuivatusnõuded: kuivatada kuiva õhu kuivatis 2..4 h, kuivatustemperatuur 80 °C, lubatud niiskussisaldus 0,05% [18]. Katsemõõtmine toimus 07. mail 2019. Kuivatiks oli GE204-2, kuivati kuivatusvõimekus 30 kg/h, materjali vajadus survevalumasina juures 23,4 kg/h.

Tabelis 3.1 on toodud niiskuse mõõtmisel saadud andmed, joonisel 3.2 on kujutatud materjali niiskuse muutumine sõltuvalt kuivatamise kestusest. Kuivatamise alguses valati materjal kinnistest kottidest suurde kasti, kust see siis vaakumtrassi abil kuivatisse transporditi. Kuivati oli jahtunud olekus. Kui punker oli materjaliga täidetud, lülitati kuivati normaalrežiimil tööle ning sellel hetkel võeti ka esimene näidiseproov. Selle proovi niiskus oli 0,06%, sama niiske oli ka otse kotist võetud proov.

**Tabel 3.1.** Materjali 100222 (PA 6/6.6) niiskuse mõõtmise tulemused

Jrk. nr.	Kommentaar	Kellaaeg	Kuivatusaeg, min	Mass, g	Mõõtmise kestus, min	Mõõdetud niiskus, %
1	Otse kotist	14:45	0	14,121	4,6	0,06
2	Jahe õhk	15:00	15	12,732	6	0,07
3	Leige õhk	15:15	30	13,11	4,6	0,07
4		15:30	45	13,594	8,2	0,06
5	Materjal soe	15:45	60	12,223	4,5	0,05
6		16:00	75	12,334	7	0,06
7	Materjal kuum	16:15	90	13,289	7	0,04
8		16:30	105	13,504	5,6	0,03
9		16:45	120	16,434	6,3	0,02
10		17:00	135	13,488	1,5	0,02



**Joonis 3.2.** Materjali 100222 (PA 6/6.6) niiskussisalduse sõltuvus kuivatamise ajast.

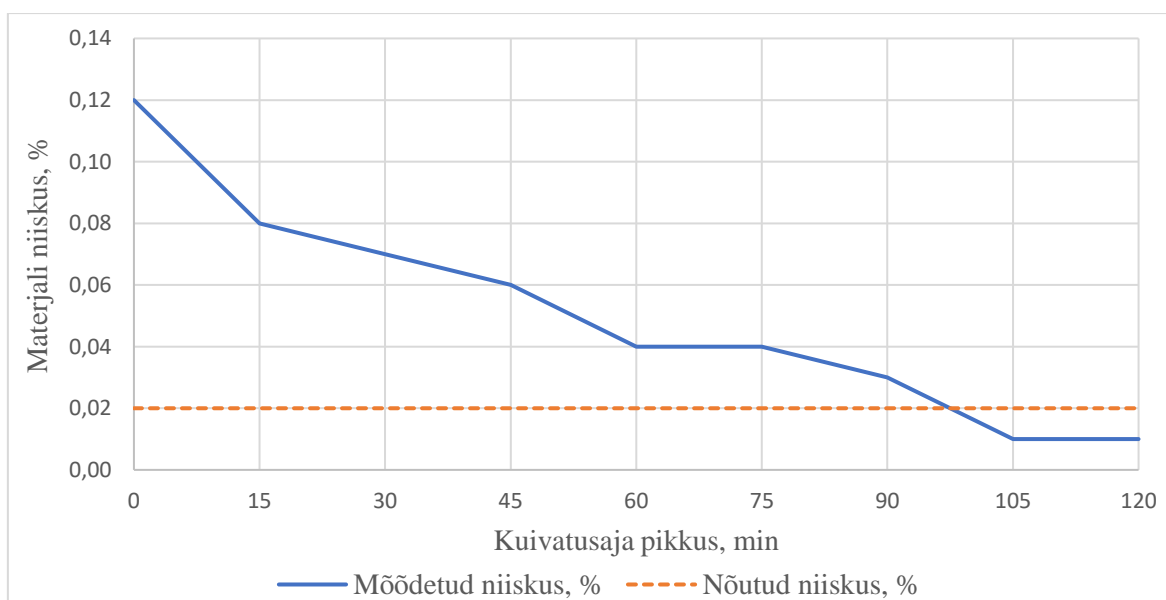
Kuivatamisprotsessi alguses on märgatav niiskussisalduse kerge tõus, see on seletatav asjaoluga et kuivatamise alguses ringles kuivatis sisuliselt sama õhk mis ümbritsevas ruumis, ning selles õhus olev niiskus kandus osaliselt ka materjalile edasi; kui kuivatis olev õhk jõudis soojeneda ning kuivada, hakkas ka materjali niiskussisaldus langema. 90 minutit peale kuivatamise algust oli niiskus 0,04% ning 120 minuti ehk kahe tunni möödudes oli niiskussisaldus juba 0,02% ning jäi sellele tasemele püsima.

Materjal ettevõttesisese artiklinumbriga **100705** – tootja GE Advanced Materials, mark „Noryl GTX964“, kuulub PPO perekonda, hügrokoopne. Tootjapoolsed kuivatusnõuded: kuivatada kuiva õhu kuivatis 2..3 h, temperatuuril 100..120 °C. Lubatud niiskussisaldus 0,02% [19]. Katsemõõtmine toimus 08. juulil 2019. Kuivati MO401, kuivati tootlikkus 65 kg/h, materjali vajadus 34,3 kg/h.

Katseandmed on toodud tabelis 3.2, niiskuse muutumise sõltuvus kuivatusajast on kujutatud joonisel 3.3. Antud materjal oli enne kuivatamist seisnud suures konteineris mittehermeetiliselt, sellega on seletatav suhteliselt suur esialgne niiskussisaldus (0,12%) võrreldes nõuetekohase niiskussisaldusega (0,02%). Seetõttu kohe kuivati käivitamisel materjali niiskussisaldus ei tõusnud, küll aga hakkas suhteliselt kiiresti langema ning saavutas 0,01% taseme juba 105 minuti möödudes.

**Tabel 3.2.** Materjali 100705 (PPE+PA) niiskuse mõõtmise tulemused

Jrk. nr.	Kommentaar	Kellaaeg	Kuivatusaeg, min	Mass, g	Mõõtmise kestus, min	Mõõdetud niiskus, %
1	Külm	16:00	0	14,659	10	0,12
3	Leige	16:15	15	15,231	9,1	0,08
4	Soe	16:30	30	13,728	10	0,07
5		16:45	45	13,422	6,4	0,06
6		17:00	60	12,234	4	0,04
7		17:15	75	13,635	10	0,04
8		17:30	90	12,864	6,4	0,03
9		17:45	105	13,771	2,6	0,01
10		18:00	120	12,698	2,1	0,01



**Joonis 3.3.** Materjali 100705 (PPE+PA) niiskussisalduse sõltuvus kuivatamise ajast.

Materjal ettevõttesisese artiklinumbriga **100851** – tootja GE Advanced Materials, mark „XENYO CL100“, kuulub PC/PBT perekonda, hügrokoopne. Tootjapoolsed kuivatusnõuded: kuivatada kuiva õhu kuivatis 2..4 h, temperatuuril 90..100 °C. Lubatud niiskussisaldus 0,02% [20]. Katsemõõtmine toimus 09. juulil 2019. Kuivati GE203-2, kuivati tootlikkus 30 kg/h, materjali kulu 11,7 kg/h.

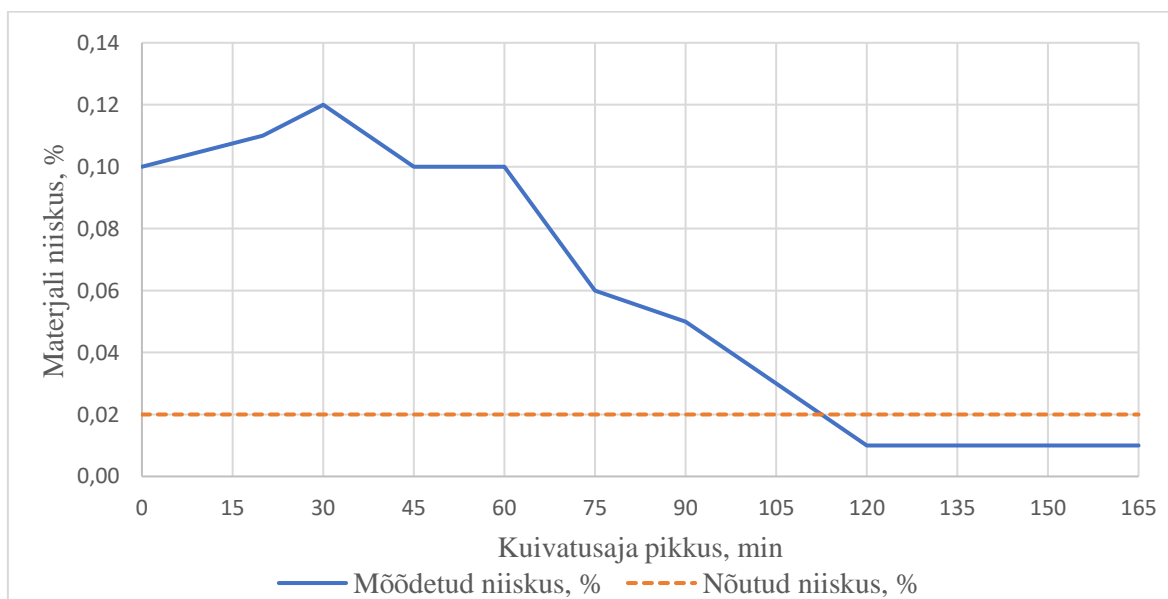
Katseandmed on toodud tabelis 3.3, niiskuse muutumise sõltuvus kuivatusajast on kujutatud joonisel 3.4. Materjal valati õhukindlatest kottidest konteinerisse, sealt liikus see vaakumtrassi kaudu kuivatisse. Kotist võetud materjali niiskussisaldus oli 0,10%.

Järjekordselt on näha, et peale kuivati töölerakendamist tõusis materjali niiskus 0,12%; peale tunniajalist kuivatamist saavutas materjal esialgse niiskuse (0,10%) ning sealt edasi hakkas materjal kiiresti kuivama, saavutades järgmise tunni jooksul nõuetele vastava niiskussisalduse (0,01%).

**Tabel 3.3.** Materjali 100851 (PC/PBT) niiskuse mõõtmise tulemused

Jrk. nr.	Kommentaar	Kellaaeg	Kuivatusaeg, min	Mass, g	Mõõtmise kestus, min	Mõõdetud niiskus, %
1	Külm, kotist	9:00	0	13,87	6,5	0,10
2		9:20	20	15,034	10	0,11
3	Leige	9:30	30	13,713	10	0,12
4		9:45	45	14,201	10	0,10
5		10:00	60	14,757	10	0,10
6		10:15	75	16,004	9,1	0,06
7		10:30	90	13,998	8,8	0,05
8	Kuum	10:45	105	14,61	6,1	0,03
9		11:00	120	14,382	1,5	0,01
10		11:15	135	15,919	1,6	0,01
11		11:30	150	14,913	1,6	0,01
12		12:30	165	13,902	2,8	0,01

Antud juhul võttis kuivatamine aega sama palju kui tootja poolt minimaalselt ette nähtud ehk kaks tundi.



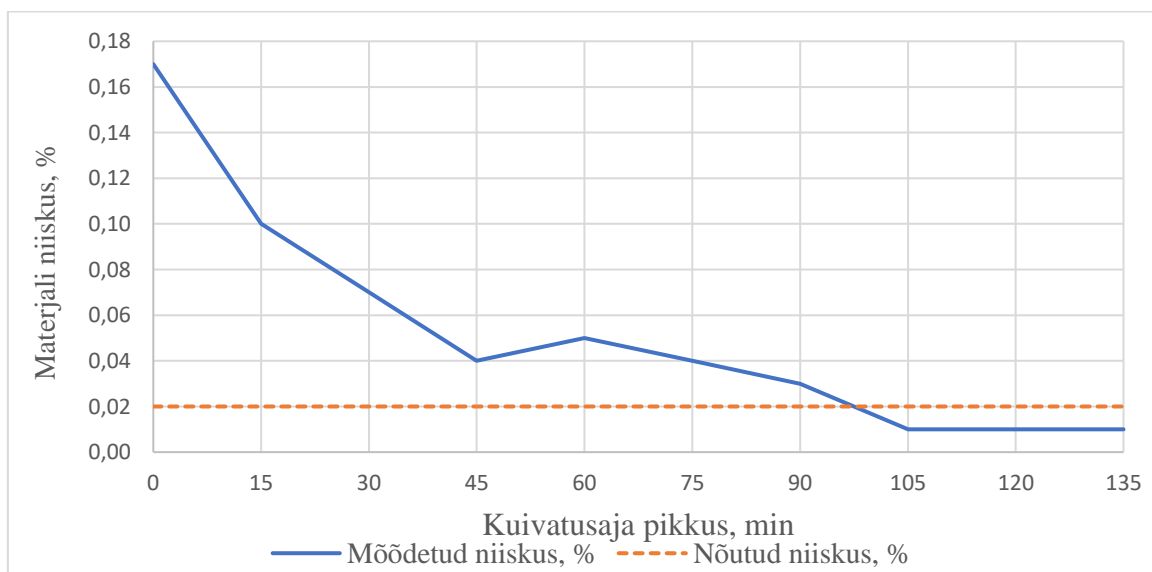
**Joonis 3.4.** Materjali 100851 (PC/PBT) niiskussisalduse sõltuvus kuivatamise ajast.

Materjal ettevõttesiseses artiklinumbriga **100533** – tootja Ides Prospector, mark „Terluran® GP-22“, kuulub ABS perekonda, hügrokoopne. Tootjapoolsed kuivatusnõuded: kuivatada kuiva õhu kuivatis 2.4 h, temperatuuril 80 °C. Lubatud niiskussisaldus on 0,02% [21]. Katsemõõtmine toimus 10. juulil 2019. Kuivati PI401, kuivati kuivatusvõimekus 65 kg/h, materjali vajadus survevalumasina juures 56,8 kg/h.

Katseandmed on toodud tabelis 3.4, niiskuse muutumise sõltuvus kuivatusajast on kujutatud joonisel 3.5. Materjal lahtises oktabiinis, seega ilmselt niiskunud ümbritseva õhu toimel, esialgne niiskussisaldus 0,17%. Kuivatama hakates toimus alguses kiire niiskuse alanemine, jõudes 45 minutiga tasemeni 0,04%. Edasine kuivamine toimus aeglasemalt, nõutud niiskussisalduse saavutas materjal järgneva 60 minuti pärast.

**Tabel 3.4.** Materjali 100533 (ABS) niiskuse mõõtmise tulemused

Jrk. nr.	Kommentaar	Kellaaeg	Kuivatusaeg, min	Mass, g	Mõõtmise kestus, min	Mõõdetud niiskus, %
1	Külm	10:00	0	13,663	10	0,17
2		10:15	15	13,886	10	0,10
3	Leige	10:30	30	13,99	10	0,07
4	Soe	10:45	45	15,606	5,8	0,04
5		11:00	60	14,834	10	0,05
6	Kuum	11:15	75	15,532	10	0,04
7		11:30	90	14,107	6,6	0,03
8		11:45	105	15,051	4,3	0,01
9		12:00	120	15,497	1,5	0,01
10		12:15	135	15,809	1,6	0,01



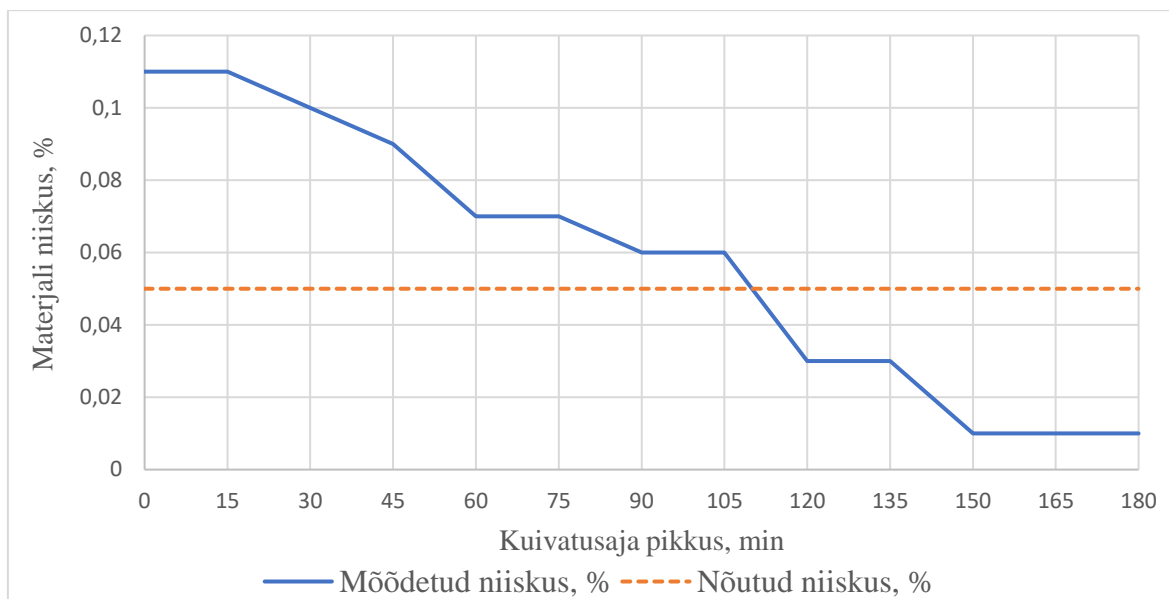
**Joonis 3.5.** Materjali 100533 (ABS) niiskussisalduse sõltuvus kuivatamise ajast.

Materjal ettevõttesiseses artiklinumbriga **100223** – tootja Radici Group Plastics, mark „Radiflam A RV250 AF 333 NER“ armeeritud 25% klaasfiibriga, kuulub PA 6.6 perekonda, väga hügrokoopne. Tootjapoolsed kuivatusnõuded: kuivatada kuiva õhu kuivatis 2..4 h, temperatuuril 70..90 °C. Lubatud niiskussisaldus on 0,05% [22]. Katsemõõtmine toimus 12. juulil 2019. Kuivati GE102-2, kuivati kuivatusvõimekus 15 kg/h, materjali vajadus survealumasina juures 3,7 kg/h.

Katseandmed on toodud tabelis 3.5, niiskuse muutumise sõltuvus kuivatusajast on kujutatud joonisel 3.6. Vaadeldav materjal oli peale eelmist tootmiskorda kuivatisse jäänud ja seal ca 12 h jooksul maha jahtunud, sellest tulenevalt oli niiskussisaldus enne kuivati käivitamist 0,11% (kinnisest kotist võetud proovi niiskussisaldus oli 0,08%). Sellise „märja“ materjali kuivatamine nõutud tasemeni võttis aega veidi vähem kui 2 h; graafiku trendi jälgides oleks kotist võetud materjali kuivatamisel nõutud niiskus eeldatavasti saavutatud ca 1..1,5 h jooksul. Kolmetunnise kuivatamise käigus saavutati püsivaks niiskussisalduseks 0,01%, mis on mitu korda madalam nõutud 0,05% tasemest.

**Tabel 3.5.** Materjali 100223 (PA 6.6-GF25) niiskuse mõõtmise tulemused

Jrk. nr.	Kommentaar	Kellaaeg	Kuivatusaeg, min	Mass, g	Mõõtmise kestus, min	Mõõdetud niiskus, %
1	Käivitus	13:30	0	21,072	10	0,11
2		13:45	15	20,87	10	0,11
3		14:00	30	23,152	10	0,10
4	Soe	14:15	45	21,291	10	0,09
5		14:30	60	21,697	10	0,07
6		14:45	75	18,247	10	0,07
7		15:00	90	19,998	10	0,06
8		15:15	105	18,253	8	0,06
9		15:30	120	16,676	1,3	0,03
10		15:45	135	18,407	1,3	0,03
11		16:00	150	20,34	1,5	0,01
12		16:15	165	19,548	1,5	0,01
13		16:15	180	19,548	1,5	0,01



**Joonis 3.6.** Materjali 100223 (PA 6.6-GF25) niiskussisalduse sõltuvus kuivatamise ajast.

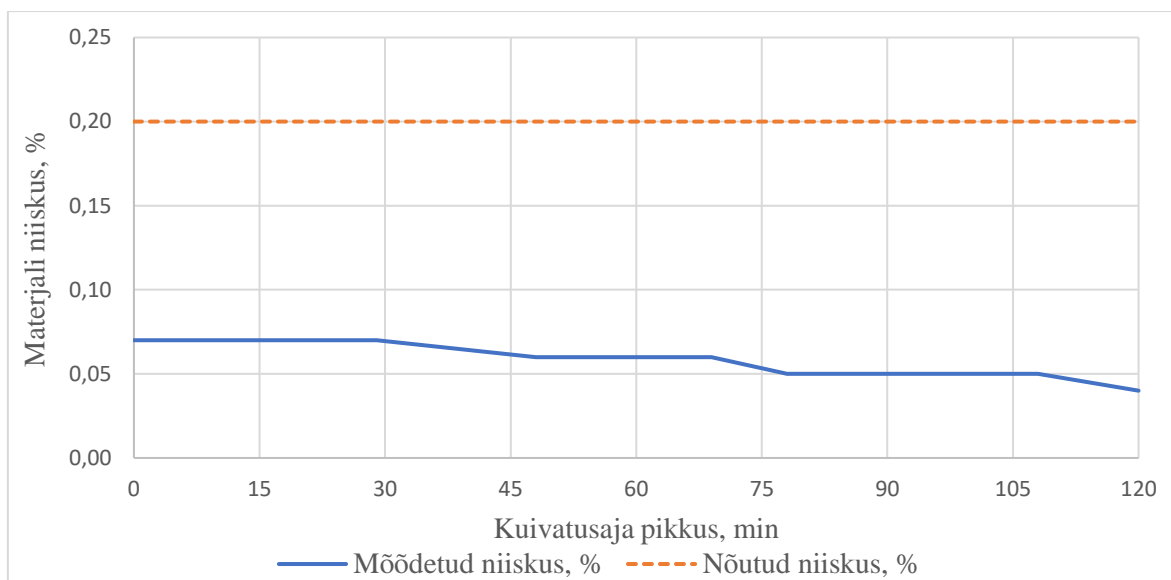
Materjal ettevõttesisese artiklinumbriga **100287** – tootja Solvay Engineering Plastics, mark „TECHNYL A 205F BLACK 21N“, kuulub PA 6.6 perekonda, väga hügrokoopne. Tootjapoolsed kuivatusnõuded: kuivatada kuiva õhu kuivatis 2..4 h, temperatuuril 80 °C, kastepunkt vähemalt -20 °C. Lubatud niiskussisaldus on 0,20% [23]. Katsemõõtmine toimus 11. juulil 2019. Kuivati GE205-2, kuivati kuivatusvõimekus 30 kg/h, materjali vajadus survevalumasina juures 14,7 kg/h.

Katseandmed on toodud tabelis 3.6, niiskuse muutumise sõltuvus kuivatusajast on kujutatud joonisel 3.7. Materjal laaditi kuivatisse õhukindlatest kottidest, kotist võetud materjaliproovi niiskussisaldus oli 0,07%. Kuivamise kiirus oli suhteliselt aeglane, kahe tunniga saavutas materjal niiskuse tasemeks 0,04%. Tähelepanuväärne on, et tegelikult seda materjali poleks üldse kuivatada vaja olnud, sest juba kotist võttes oli niiskussisaldus märgatavalt väiksem kui tootja poolt nõutud 0,20%.



**Tabel 3.6.** Materjali 100287 (PA 6.6) niiskuse mõõtmise tulemused

Jrk. nr.	Kommentaar	Kellaaeg	Kuivatusaeg, min	Mass, g	Mõõtmise kestus, min	Mõõdetud niiskus, %
1	Käivitus	13:23	0	17,302	6	0,07
2		13:37	14	17,45	10	0,07
3		13:52	29	15,009	10	0,07
4		14:11	48	19,206	10	0,06
5		14:26	69	18,585	9,3	0,06
6		14:41	78	19,593	8,6	0,05
7		14:56	93	21,302	10	0,05
8		15:11	108	18,305	6,4	0,05
9		15:25	120	20,531	1,6	0,04



**Joonis 3.7.** Materjali 100287 (PA-6.6) niiskussisalduse sõltuvus kuivatamise ajast.

## 4. KUIVATAMISE ENERGIATARVE

Paraku pole ettevõttes kasutatavad kuivatid varustatud eraldi energiakulumõõturitega, seega polnud katsemõõtmiste käigus võimalik vaadeldavate kuivatite reaalseid võimsuseid ja energiatarvet määrata. Küll aga õnnestus autoril lasta mõõta mõnel kuivatil liinivoolud (voolutugevuste mõõtmiseks kasutati multimeetrit Kyoritsu Kew Mate 2000), ning selle põhjal hinnata kuivati hetkevõimsust. Kolmefaasilises süsteemis avaldub võimsus

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi ,$$

kus  $P$  – võimsus W;

$U$  – pingeline V;

$I$  – voolutugevus A;

$\cos \varphi$  – võimsustegur [7: 70].

Kuna põhiosa kuivati võimsusest moodustavad aktiivvõimsust tarbivad küttekehad (kuivatusõhu ja absorptsioonikolonnide regenereerimiselementide küttekehad) ning ventilaatorit käitava mootori osakaal kogu võimsustarbes on suhteliselt väike, siis võime antud juhul teatud mõõndusega võimsusteguri lugeda võrdseks ühega.

Näiteks materjali 100222 kuivatamisel (vt pt 3.3) kuivatiga Gerco TTM-2/200E (nimiaandmed vt pt 2.5) võis täheldada, et liinivoolud, olles võrdsed kõigi kolme faasi korral, olid kas 2,3 A või 18 A. Selliste voolude korral oleksid hinnangulised võimsused siis vastavalt 1,6 kW ja 12,5 kW. Erinevus on seletatav asjaoluga, et kuivatusõhu küttekeha rakendus tööle regulaarsete intervallide järel, samas kui kuivatusõhu ventilaator töötas pidevalt. Kummagi absorptsioonikolooni regeneratsiooniprotsessi hetkel ei toimunud. Hinnanguliselt töötas kuivatusõhu küttekeha ca 30% vaadeldud ajast, seega ühe tunni jooksul tarbis vaadeldav kuivati  $0,7 \cdot 1,6 + 0,3 \cdot 12,5 = 4,87$  kWh elektrienergiat.

Kuna vaatluse ajal materjali 100222 vajadus survealumasina juures oli 23,4 kg/h, siis sellest järeldub, et ühe kg materjali kuivatamiseks kulus  $4,87 / 23,4 = 0,21$  kWh energiat.

Tuleb tungivalt rõhutada, et ülaltoodud arvutuskäik on antud juhul ainult informatiivne. Täpsete tulemuste leidmine on võimalik vaid juhul, kui igale kuivatile on paigaldatud oma energiakulumõõtur. See võimaldaks arvestada ka regeneratsioonile kuluva energiaga.

## 5. JÄRELDUSED

Katsemõõtmiste tulemusena selgus, et kui materjali on hoitud kuivades tingimustes ja kinnises pakendis, siis üldjuhul piisab mõnevõrra lühemast kuivatusajast kui materjalitootja minimaalsena ette on näinud. Üldjuhul on ka kuivatatud materjali niiskussisaldus tunduvalt madalam tootja poolt ette nähtust, järelikult on kulutatud liigselt energiat ebavajaliku kuivusastme saavutamiseks.

Valik, mille põhjal konkreetne kuivati mingi materjali jaoks valitakse, põhineb kuivati kuivatusvõimel (mitu kg materjali suudab tunnis kuivatada) ja materjali tarbimishulgal survealumasina juures (mitu kg materjali kulutatakse tunnis toodete valmistamiseks). Tavaliselt valitakse kuivati teatud varuga, nii et kuivati kuivatusvõime oleks suurem või vähemalt võrdne materjali tarbimishulgaga. Kui materjali kuivatamiseks on ette nähtud näiteks 4 h, kuid tegelikkuses saavutatakse soovitud niiskussisaldus poole lühema ajaga, siis see tähendab, et materjal võiks läbida kuivati punkri poole kiiremini, see omakorda tähendab et kuivatamiseks võiks valida poole väiksema võimekusega kuivati, ning väiksema kuivati kasutamine annab märkimisväärse energiasäästu (näiteks 100 liitrise punkriga kuivati Gerco TTM-2/100E nimivõimsus on ca 50% väiksem kui 200 liitrise punkriga kuivatil Gerco TTM-2/200E).

Väga arvestatav energia kokkuhoid on samuti saavutatav töö otstarbeka organiseerimisega, st et kuivatit ei tohiks liiga vara enne tootmise alustamist tööle panna. Pahatihti käivitatakse kuivatid liiga vara, näiteks kui plaanijärgne tootmine survealumasinal hakkab lõuna paiku, siis materjalikuivati on juba südaööl tööle pandud. Õige oleks kuivati käivitada sellise arvestusega, et kohe kui materjal on saavutanud oma soovitud niiskussisalduse, hakatakse seda survealumasina poolt tarbima.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli katseliselt tuvastada, kas plastmaterjale on tööstuslikes tingimustes võimalik kiiremini kuivada kui tootjapoolsed soovitusel ette näevad. Selleks kirjeldas autor plastmasside kuivatamise olemust, enamlevinud kuivatamismeetodit, niiskussisalduse mõõtmist ning viis läbi katsetused tegeliku kuivamisaja leidmiseks.

Katsetuseks valiti mitmeid plastmaterjale, millel enne kuivati käivitamist mõõdeti esialgne niiskussisaldus, seejärel peale kuivatamisprotsessi algust mõõdeti iga 15 minuti pärast uuesti kuivatatava materjali niiskussisaldus, mis graafikule kantuna võimaldas kirjeldada niiskussisalduse muutumist sõltuvalt kuivatusajast. Tulemuste põhjal selgus, et üldjuhul saavutas materjal soovitud niiskussisalduse lubatud temperatuuril kuivatades ca kaks korda kiiremini tootja poolt ette nähtud keskmisest kuivatusajast. Siinkohal tuleb tähelepanu juhtida asjaolule, et kuivatusaja optimeerimisega ei tohiks siiski liiale minna, sest nii viisi kasvab tõenäosus et halbade juhuste kokkulangemisel satub survealumasinasse ebapiisavalt kuivatatud materjal, mis ulatuslikke lõpptoodangu kvaliteediprobleeme kaasa tuues nullib igasuguse kuivatamise optimeerimisel saavutatud kokkuhoiu.

Edasiste sammudena soovib autor paigaldada kuivatitele energiakulumõõturid, mõõtmaks iga kuivati tegelikku energiatarbimist. Kombineerides saadud andmed katseliselt leitava tegeliku kuivatusajaga ja kuivati tootlikkusega saab arvutada iga kuivati energiatõhususe ning sellest tulenevalt ebatõhusad kuivatid asendada.

Järgmiste uuringute käigus tuleks välja selgitada, kuidas oleks võimalik materjalide niiskussisalduse mõõtmist operatiivsemaks muuta; ideaalis peaks see toimuma reaalajas kuivati juures kuivatatud materjali liikumisel kuivatist survealumasina juurde. Selline kohene niiskussisalduse mõõtmine võimaldaks automaatselt seadistada kuivati tööparameetreid ning vältida olukorda, kus raisatakse liigselt energiat materjali ebavajaliku kuivatamise peale. Käesoleva töö kirjutamine andis autorile suhteliselt hea ülevaate plastmasside olemusest, töötlemisviisidest ning põhilistest lahendamist vajavatest tööstusliku tootmise tingimustes toimuvast plastmasside kuivatamisega seotud väljakutsetest.

## **SUMMARY**

The purpose of this Bachelor's thesis was to experimentally determine whether plastic materials can be dried faster than the manufacturer's recommendations state. To do this, the author described the nature of plastics drying, one of the most common drying method, the measurement of moisture content and finally conducted experiments to find the actual drying times.

A number of plastic materials were selected for the test, which measured the initial moisture content before starting of the dryer, and then every 15 minutes after the start of the drying process measured the moisture content of the material. The results showed that the material generally reached the desired moisture content at about half the average drying time prescribed by the manufacturer. It should be noted that optimizing the drying time should not go too far, as this will increase the likelihood that insufficiently dried material will reach the injection molding machine and that could eliminate any energy savings in optimizing the drying process.

As a next step, the author recommends installing energy meters on the dryers to measure the actual power consumption of each dryer. By combining the data obtained with the energy meters with experimentally found actual drying times and dryer productivity, the energy efficiency of each dryer can be calculated and, consequently, inefficient dryers could be identified and replaced.

Future studies should identify ways of how to make the measurement of moisture content more operational; ideally, this should take place in real time within the dryer right before the material is moved to the injection molding machine. Such an immediate measurement of the moisture would allow to automatically adjust the operating parameters of the dryer and avoid wasting too much energy on excessive drying.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Rosato, D. V., Rosato, D. V., Rosato, M. G.** (2000). Injection molding handbook. New York: Springer Media + Business Media. 1457 lk.
2. **Piiraja, E.** (1975). Plastmassid. Tallinn: Valgus. 400 lk.
3. **Treier, V., Hovi, M.** (1997). Kuivatusõpetus. Tartu: Eesti Põllumajandusülikool. 64 lk.
4. **Poobus, A., Tiikma, T.** (2002). Kuivatustehnika. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 137 lk.
5. Scientific Molding Pocket Guide. Fourth Edition. Dracut: Routsis Training. 94 lk.
6. **Steinbüchel, R.** (2006). Injection Molding Technologies - Drying. Bayer: MaterialScience. 38 lk.
7. **Võrk, R., Mägi, V.** (1989). Elektrotehnika. Tallinn: Valgus. 391 lk.
8. Soojustehnika käsiraamat. (1977). /Koost. I Mikk. Tallinn: Valgus. 619 lk.
9. **Kulu, P., Kübarsepp, J., Hendre, E., Metusala, T., Tapupere, O.** (2001). Materjalid. Tallinn. 86 lk.
10. **Harper, C. A., Petrie, E. M.** (2003). Plastic Materials and Processes. A Concise Encyclopedia. New Jersey: John Wiley & Sons. 974 lk.
11. **Brydson, J. A.** (1999). Plastic Materials. Oxford: Butterworth-Heinemann. 920 lk.
12. **Harper, C. A.** (2004). Handbook of Plastics, Elastomers & Composites. McGraw-Hill Companies. 757 lk.
13. **Mujumdar, A. S.** (2006). Handbook of Industrial Drying. Taylor and Francis Group, LLC. 1279 lk.
14. Wittmann. (2019). Dry Air Dryers for Plastic Resin. [on-line] [https://www.wittmann-group.com/uploads/tx\\_wpsidebar/Dryers\\_english\\_2019-02\\_lowres.pdf](https://www.wittmann-group.com/uploads/tx_wpsidebar/Dryers_english_2019-02_lowres.pdf) (13.08.2019).
15. **Richardson, J.** (2007). Shaping Processes For Plastics. John Wiley & Sons. [on-line] <http://slideplayer.com/slide/8652363/> (10.08.2019).
16. **Sepe, M. P.** (2012). The Myth of Resin Overdrying. [on-line] <https://www.youtube.com/watch?v=0Jy7Qu0Nza4> (10.08.2019).
17. DuPont™ Rynite® PET Thermoplastic Resins. Molding Guide. [on-line] [https://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/plastics-polymers-and-resins/thermoplastics/documents/Crastin/Rynite\\_Molding\\_Guide\\_RYE\\_A11161\\_00\\_B0615.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/plastics-polymers-and-resins/thermoplastics/documents/Crastin/Rynite_Molding_Guide_RYE_A11161_00_B0615.pdf) (11.08.2019).
18. DuPont™ Zytel. Nylon Resin. Product Information. 5 lk.
19. GE Advanced Materials. (2006). Noryl GTX® Resin GTX964. 5 lk.

20. GE Advanced Materials. (2006). Xenoy<sup>\*</sup> Resin CL100. 4 lk.
21. IDES Prospector. (2011). Terluran® GP-22. 2 lk.
22. Radici Group Plastics. (2006). RADIFLAM A RV250 AF 333 NER. Technical Data Sheet. 1 lk.
23. Solvay Engineering Plastics. (2018). TECHNYL A 205F BLACK 21N. Technical Data Sheet. 5 lk.
24. Gerco Technik GmbH. Desiccant dryer TTM 2 / 200 EST. Product Information. [*on-line*] [https://www.gerco-technik.de/cms/upload/pdf/en/InfoTTM2\\_200ES.pdf](https://www.gerco-technik.de/cms/upload/pdf/en/InfoTTM2_200ES.pdf) (15.08.2019).

# LIHTLITSENTS

## **Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Kaarel Paurson, sünniaeg 13.02.1982

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Plastmasside eelkuivatamise energiatõhusus,

mille juhendaja on Toivo Leola,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 19.08.2019

---

## **Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)